

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВОВЛЕЧЕНИЯ КАПЕЛЬ В ВИХРЕВОЕ  
ДВИЖЕНИЕ ПОТОКОМ ГАЗА В МАССООБМЕННОЙ КАМЕРЕ  
РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ПРОТИВОТОЧНОГО АППАРАТА**

**В. И. Склабинский**, д-р техн. наук;

**Н. А. Кочергин**, канд. техн. наук\*;

**Джалал Мохаммед Мохаммед Абдуллах**,

Сумский государственный университет, г. Сумы,

\*Северодонецкий технологический институт Восточнoукраинского  
национального университета им. В. Даля, г. Северодонецк

*Теоретично встановлено і експериментально перевірено, що краплі рідини розміром 10-150 мкм практично відразу після руйнування струменів рідини газовим потоком залучаються до обертального руху. Відцентрові сили, які при цьому діють на краплі, перешкоджають виникненню бризковіднесення у вихровому протиточному розпилювальному масообмінному апараті.*

**Ключові слова:** гідродинаміка, крапля, швидкість газу, вихровий потік, масообмінний апарат.

*Теоретически установлено и экспериментально проверено, что капли жидкости размером 10-150 мкм практически сразу после разрушения струй жидкости газовым потоком вовлекаются во вращательное движение. Центробежные силы, которые при этом действуют на капли, препятствуют возникновению брызгоуноса в вихревом противоточном распыливающем массообменном аппарате.*

**Ключевые слова:** гидродинамика, капля, скорость газа, вихревой поток, массообменный аппарат.

## ВВЕДЕНИЕ

В общем случае задача о движении капельного потока жидкости в вихревой массообменной камере ВРПМА является очень сложной задачей и в настоящее время сталкивается с рядом сложностей. Так, необходимо учитывать неоднородность потока капель, которые возникают в результате распыливания струй жидкости в центральной области вихревой камеры, взаимное влияние потока капель друг на друга, неоднородность потока капель, возможные столкновения капель между собой и ряд других довольно сложных явлений, описание которых математически представляет очень сложную задачу. Схема движения потоков в рабочей вихревой массообменной камере ВРПМА показана на рис. 1.

Для поиска приемлемого решения приходится прибегать к ряду обоснованных упрощающих допущений, которые, при вводе их в условие задачи, с одной стороны, позволяют получить математические зависимости, решения которых возможны в численном и даже в аналитическом виде, с другой стороны, такие упрощающие допущения позволяют получить численные решения, с небольшой погрешностью отличающиеся от реальной картины и гидродинамических характеристик промышленных вихревых массообменных аппаратов.

Для решения различных задач по определению гидродинамики вихревого капельного потока и создания математической модели движений капельного потока в рабочей области вихревого распыляющего противоточного массообменного аппарата (ВРПМА) принимаем следующие упрощающие допущения, основанные на том, что в исследуемом противоточном движении микрокапель жидкости и газа

представляет интерес описание движения отдельной капли жидкости, что можно обосновать следующим образом:

- высокие относительные скорости газа и жидкости позволяют получить спектр капель, близкий к монодисперсному. Средний размер капель в этом случае определяется достаточно точно;
- на капли одинакового размера действуют одинаковые силы, и движение капель происходит по одинаковым траекториям. Вследствие этого в массообменной камере возникает упорядоченное движение дискретной фазы в виде капель и газового потока;
- при движении капель друг за другом на расстоянии  $L > 10d_k$  и рядом на расстоянии  $L > 3d_k$  гидродинамическим влиянием капель между собой можно пренебречь [1].

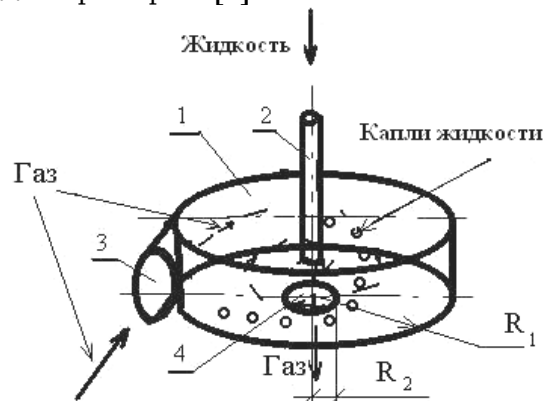


Рисунок 1 - Схема движения потоков в ВРПМА:  
1 - вихревая камера; 2 - распылитель жидкости;  
3 - тангенциальный подвод газа; 4 - осевой отвод газа

Для определения гидродинамических параметров вихревого капельного потока необходимо знать граничные или начальные условия движения капель сразу после распыления в центральной области ВРПМА. Для решения такой задачи необходимо знать, насколько быстро капли жидкости вовлекаются во вращательное движение и каких скоростей в зоне распыления они достигают. Это позволяет провести анализ насколько устойчивым является противоточное движение вихревых потоков газа и капель жидкости, что возможно при вовлечении капель сразу после распыления во вращательное движение с большими окружными скоростями, достаточными для достижения величин центробежных сил, больших по величине, чем силы аэродинамического сопротивления. Это позволяет правильно организовывать процесс распыления с точки зрения отсутствия уноса жидкости из зоны распыления в выходной патрубок газа.

## МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Методика моделирования.** Для решения поставленной задачи воспользуемся известными уравнениями о движении частицы в вихревом осесимметричном потоке газа [2]. При этом исходим из ранее полученных данных об отсутствии осевой составляющей скорости газового потока в рабочей области вихревой массообменной камеры [3], пренебрегаем третьим уравнением системы, которое описывает движение капли вдоль оси  $Z$ , т.е. вдоль оси массообменной камеры. Кроме этого, предполагаем, что характерный диаметр получаемых капель жидкости очень мал (около 100 мкм) и поверхностные силы в таких малых каплях достаточно велики, чтобы предотвратить деформацию капли газовым потоком и

сохранить ее сферическую форму. Вводя геометрические характеристики капли, учитывая свойства газа и жидкости уравнения движения капли в осесимметричном газовом потоке вихревой массообменной камеры, уравнение движения капли в осесимметричном вихревом потоке газа принимает вид

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} W_f(\tau) = -\frac{W_r(\tau)W_f(\tau)}{r} + \frac{1}{8} \frac{\psi \pi \rho_g d_k^2 (V_f(r) - W_f(\tau))^2}{m} \\ \frac{d}{d\tau} W_r(\tau) = \frac{W_f(\tau)^2}{r} + \frac{1}{8} \frac{\psi \pi \rho_g d_k^2 (V_r(r) - W_r(\tau))^2}{m} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $m$  – это масса капли жидкости;  $\tau$  – время;  $\psi$  – коэффициент сопротивления;  $\rho_g$  – плотность жидкости;  $W_r(\tau)$  и  $W_f(\tau)$  – радиальная и окружная составляющие скорости капли;  $V_r(r)$  и  $V_f(r)$  – радиальная и окружная составляющие скорости газа;  $r$  – текущее значение радиуса вихревой массообменной камеры.

Решение данной системы уравнений сталкивается с трудностями, которые заключаются в невозможности получить решение в явном виде. Так, например, можно получить решение для окружной составляющей скорости капли жидкости в неявном виде:

$$\begin{aligned} W_r = & -\frac{1}{\tau_1} \left( r \left( -\text{RootOf} \left( r^2 \left( \tau_1 W_{f1}^2 Z^2 - 2\tau_1^2 W_{f1} Z K V_f e^{-K\tau_1+2Z} + \right. \right. \right. \right. \\ & + K^2 V_f^2 \tau_1^3 e^{2Z-Kt} + 2\tau_1^2 W_{f1} Z K V_f e^{\frac{K\tau_1^2-Z\tau_1-Z\tau}{\tau_1}} - 2K^2 V_f^2 \tau_1^3 e^{\frac{K\tau_1^2-Z\tau_1-Z\tau}{\tau_1}} - \\ & - 2\tau_1^2 W_{f1} Z^2 e^{\frac{K\tau_1^2-Z\tau}{\tau_1}} + K V_f e^{\frac{K\tau_1^2-Z\tau_1-Z\tau}{\tau_1}} + 2K^2 V_f^2 \tau_1^3 e^{\frac{K\tau_1^2-Z\tau_1-Z\tau}{\tau_1}} - \\ & - K r V_r \tau Z^2 e^{\frac{\tau(K\tau_1-2Z)}{\tau_1}} + K r W_{r1} \tau_1 Z^2 e^{\frac{\tau(K\tau_1-2Z)}{\tau_1}} - r^2 K Z e^{\frac{K\tau_1^2-Z\tau}{\tau_1}} + r^2 K^2 Z^2 \tau_1 e^{\frac{K\tau_1^2-Z\tau}{\tau_1}} + \\ & \left. \left. \left. + K r V_r \tau_1 Z^2 e^{\frac{K\tau_1^2-Z\tau}{\tau_1}} - K^2 V_f^2 \tau_1^3 e^{\frac{\tau(K\tau_1-2Z)}{\tau_1}} + K^2 V_f^2 \tau_1^3 e^{\frac{K\tau_1^2-2Z\tau}{\tau_1}} \right) \right) + K\tau_1 \right), \end{aligned} \quad (2)$$

но численный анализ результатов расчетов по такой математической зависимости затруднен.

Из приводимого анализа можно сделать вывод, что в связи с тем, что поиск решения о движении капли и нахождении зависимости скоростей капли от времени в фиксированной точке пространства вихревой массообменной камеры сталкивается с определенными трудностями, целесообразно провести такой анализ путем решения вышеприведенной системы уравнений (1) в численном виде.

На рис. 2 приводится пример такого решения. Расчеты для газового потока на радиусе, который равен радиусу распыливания жидкости, проводились по выведенной ранее авторами аналитической зависимости [4].

$$V_f(r) = \frac{V_{f1} (R_l^2 V_{r1} + R_l \varepsilon + R_l \frac{V_{r1} R_l + \varepsilon}{\varepsilon} + R_l \frac{V_{r1} R_l + 2\varepsilon}{\varepsilon})}{(V_{r1} R_l + 2\varepsilon) r}, \quad (3)$$

где  $V_{f1}$  - окружная скорость газа на входе в вихревую массообменную камеру;  $\varepsilon$  - коэффициент турбулентной вязкости;  $R_1$  - радиус вихревой камеры.

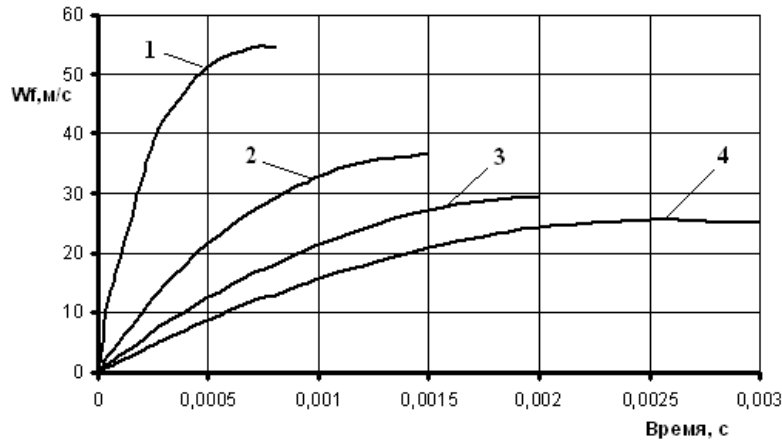


Рисунок 2 – Зависимость изменения окружной составляющей капли в области, близкой к радиусу распыления для капель диаметром 1 – 10 мкм; 2 – 50 мкм; 3 – 100 мкм; 4 – 150 мкм.

В виде графических зависимостей показана зависимость возрастания составляющих скоростей жидкости (капли) во времени для окружных скоростей газового потока в области распыления струй жидкости, равных 83 м/с, радиальной составляющей скорости газового потока, равной 9 м/с, и в случае проведения распыления жидкости на капли на радиусе, который соответствует радиусу патрубка отвода газа из вихревой камеры, равному 0,05 м (для простоты расчетов здесь и далее приняты в качестве газовой фазы воздух, а в качестве жидкой – вода). Из полученных графиков можно сделать вывод о справедливости ранее высказываемого предположения о практически моментальном вовлечении капель, после распыления струй в области максимальных окружных скоростей газового потока, во вращательное движение со скоростями, которые соизмеримы со скоростями газового потока.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ приводимых на рис. 2 графических зависимостей показывает, что, например, для приведенных выше условий время вовлечения капли размером 100 мкм во вращательное движение со скоростями достаточными для создания поля центробежных сил, которые увлекают капли противоточно газу от центра к периферии, составляет 0,002 с.

Определенный интерес представляет теоретический анализ продолжительности вовлечения капель во вращательное движение в зависимости от диаметра получаемых капель жидкости.

На рис. 2 также приведены результаты расчетов изменения скорости вовлечения капель жидкости во вращательное движение в зависимости от разной величины диаметра получаемых капель жидкости. Из приведенных графических зависимостей видно, что с увеличением диаметра капель жидкости происходит и увеличение времени вовлечения их во вращательное движение до величин скоростей, соизмеримых со скоростями газового потока. Так, например, увеличение диаметра капли с 10 мкм до 150 мкм приводит к возрастанию времени с 0,0008 с до 0,003 с.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика эксперимента. Определить экспериментально скорости капель непосредственно внутри вихревой камеры является сложной задачей. Поэтому было принято решение об определении достоверности получаемых в результате расчета значений скорости вовлечения капель во вращательное движение косвенным путем по показаниям брызгоуноса. Эксперимент проводился на гидродинамическом стенде с размерами вихревой массообменной камеры ВРПМА, которые использованы в расчетах, приведенных выше. Замеры брызгоуноса определялись по разнице количества жидкости, которая подавалась на распылитель ВРПМА и количеством измеряемой жидкости, которая отводилась с цилиндрических стенок вихревой камеры ВРПМА. Это соответствует количеству жидкости, которая в виде капельного потока проходит противотоком газу от центра вихревой массообменной камеры к ее периферии.

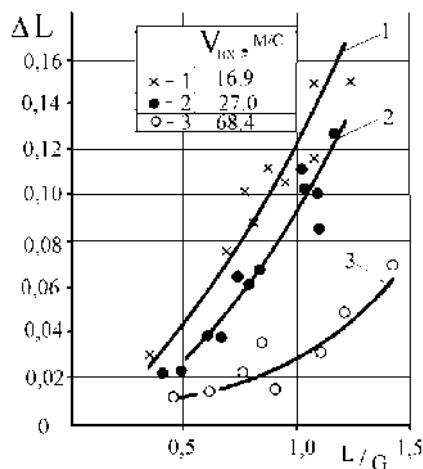


Рисунок 3 - Изменение относительной величины брызгоуноса от нагрузок по фазам при различных входных скоростях  $Vf_1$ , м/с: 1 - 16,9; 2 - 27,0; 3 - 68,4

**Результаты эксперимента.** Результаты измерений показывают (рис. 3), что при малых нагрузках по жидкости и соответственно высоких окружных скоростях газа в зоне распыления жидкости величина брызгоуноса мала, что говорит о том, что на таких режимах распыляемые капли практически сразу вовлекаются во вращательное движение со скоростями, величина которых достаточна для создания поля центробежных сил, увлекающих капли в вихревое противоточное газу (вдоль радиуса вихревой камеры) движение от центра к периферии. С увеличением нагрузки по жидкости окружные скорости в газовом потоке уменьшаются, диаметр распыляемых капель жидкости и время вовлечения во вращательное движение увеличиваются, что приводит к увеличению брызгоуноса.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, учитывая то, что распыление жидкости в рабочей камере ВРПМА происходит вблизи области перестройки направления движения газового потока от радиального к осевому, разработанная методика расчета скорости вовлечения капель во вращательное движение вихревым потоком газа имеет важное значение и позволяет проводить анализ гидродинамической обстановки в вихревой камере ВРПМА с

точки зрения создания гидродинамических условий, которые препятствовали бы вовлечению капель совместно с газовым потоком в патрубок отвода газа из рабочей камеры ВРПМА и стабилизировали работу ВРПМА с устойчивым противоточным движением вихревых потоков газа и капель жидкости.

## SUMMARY

### DETERMINATION OF TIME OF INVOLVING DROPS IN VORTICAL STREAM OF VORTEX SPRAY COUNTERCURRENT MASS EXCHANGE DEVICE

*V. Sklabinskiy, N. Kochergin\*, A. Jalal Mohammed,  
Sumy State University, Sumy,*

*\*Technological Institute of East Ukraine Volodymyr Dahl National University, Severodonetsk*

*It is theoretically and experimentally proved that the drops 10-150 mkm in size after the fluid flow destruction with the help of the gas flow are involved into rotatory movement. Centrifugal forces that influence drops prevent drag-out of the spray in the vortex counterflow, spraying in mass exchange device.*

**Key words:** hydrodynamics, drop, gas speed, vortex flow, mass exchange device.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзоры по отдельным производствам химической промышленности. - М.: НИИТЭХИМ, 1974. - Вып.18(68). - 48 с.
2. Зверев Н. И. О движении твердой частицы в потенциальном вращающемся потоке / Н. И. Зверев, С. Г. Ушаков // ИФЖ. - 1968. - Т.14, № 1. - С. 90-93.
3. Склабинский В. И. Гидродинамика высокоэффективных вихревых аппаратов для осушки природного газа / В. И. Склабинский, В. Г. Холин// Экотехнологии и ресурсосбережение. - 1998. - № 6. - С. 50-54.
4. Склабинський В. І. Рух потоку плаву (газу) в порожнині віброгранулятора та вихрового протитечійного масообмінного апарата / В. І. Склабинський, В. А. Осіпов, М. П. Кононенко, Д. М. Мохаммед Абдуллах // Хімічна промисловість України.- 2011. - № 1. - С. 3-5.

*Поступила в редакцию 1 декабря 2011 г.*